

УДК 536.243;622.241.8

ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ПОЛЯ В СКВАЖИНЕ ПРИ ВЫКЛЮЧЕННОЙ

ЦИРКУЛЯЦИИ ПРОМЫВОЧНОЙ ЖИДКОСТИ

TEMPERATURE FIELDS IN THE WELL AT THE SWITCHED-OFF

CIRCULATION OF DRILLING FLUID

В. С. Логинов, В. Г. Милютин

V. S. Loginov, V. G. Milyutin

Томский политехнический университет, г. Томск

Ключевые слова: теплопроводность; температура в скважине; расчет температурных полей; численное решение уравнения теплопроводности

Key words: thermal conductivity; temperature in the well; calculation of temperature fields; numerical solution of the heat equation

Исследование данных температуры промывочной жидкости (ПЖ) при бурении и последующих промывках на выходе из скважины с привязкой ее к истинным глубинам наряду с другими, измеряемыми параллельно параметрами, позволяет выявлять зоны аномально высоких пластовых давлений (АВПД) и проницаемых интервалов [1, 2]. Построение общей модели основных тепловых процессов и последующее сравнение ее конечных данных с фактическими должны обеспечить четкое выявление таких зон в реальном времени строительства скважины.

Цель исследования — разработка методики выявления на основе комплекса штатных температурных датчиков станций геолого-технологического контроля пластов, содержащих углеводороды, вскрытых ранее бурением.

Полное описание тепловых процессов, протекающих в скважине, дает общее модельное уравнение в тепловой интерпретации [3]:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 T}{\partial X^2} - v_X \frac{\partial T}{\partial X} + bT - f(\tau, X), \quad (1)$$

где $T = T(\tau, X)$ — температура ($X = x, y, z$ — в декартовой системе координат, $X = r, z, \varphi$ — в цилиндрической, $X = r, \theta, \varphi$ — в сферической); $a \frac{\partial^2 T}{\partial X^2}$ — соответствует переносу тепла теплопроводностью, a — коэффициент температуропроводности ($a > 0$), $a = \frac{\lambda}{c_p \rho}$, λ — теплопроводность, c_p — удельная теплоемкость, ρ — плотность; $v_X \frac{\partial T}{\partial X}$ — соответствует конвективному переносу, v_X — проекция скорости по выбранной оси координат; bT — диссипация энергии, b — коэффициент перехода энергии движения в теплоту; $f(\tau, X)$ — внешний источник энергии.

Процесс строительства скважины заключается в выполнении чередующейся последовательности технологических операций, продолжительность которых прогнозируется, но не определена. Эти операции можно разбить на две группы:

1) с вынужденной циркуляцией ПЖ, осуществляющей ее подачей буровыми насосами с дневной поверхности через бурильную колонну (БК) в затрубное пространство (кольцевое пространство между стенками скважины и внешней стенкой БК) с последующим выходом на дневную поверхность (бурение, промывка, проработка);

2) без циркуляции (наращивание, спуск подъемные операции и все остальные). Такому разбиению поставим в соответствие частные случаи уравнения (1): дифференциальное уравнение теплопроводности Фурье — Кирхгофа [4] при включенной циркуляции ПЖ

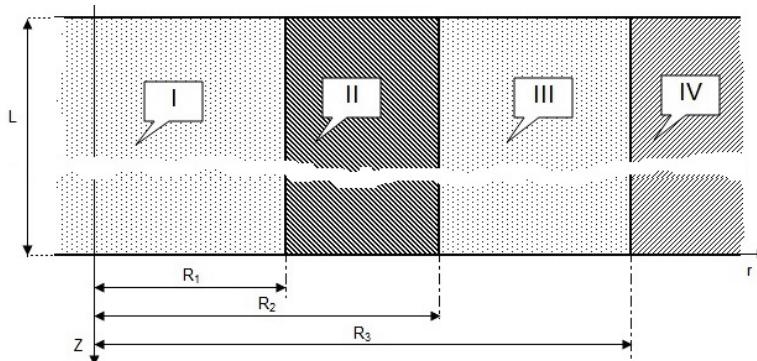
$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 T}{\partial X^2} - \nu_X \frac{\partial T}{\partial X}, \quad (2)$$

а при отсутствии движения жидкости

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 T}{\partial X^2}. \quad (3)$$

Таким образом, общую тепловую модель возможно представить как систему решений частных задач, соответствующих текущему технологическому процессу.

Представим одно такое решение. Рассмотрим вертикальный участок открытого ствола скважины (не обсаженного колонной) длиной L сразу же после выключения циркуляции промывочной жидкости. На рисунке 1 показан этот участок, определяющий геометрическую постановку задачи. Области I и III заполнены ПЖ. Они разделены между собой БК (область II).



*Рис. 1. Вертикальный участок открытого ствола скважины:
область I — пространство внутри бурильной колонны; область II — стенка колонны; об-
ласть III — пространство между внешней поверхностью колонны и окружающей
скважину горной породой; область IV — сама горная порода, окружающая скважину*

Решение задачи зададим уравнениями теплопроводности (3) для каждой из областей, исходя из геометрии, в цилиндрической системе координат [5, 6] при условии симметрии относительно оси скважины в интервале времени $0 < \tau < \tau_{\text{кон}}$

$$\frac{\partial T_1}{\partial \tau} = a_1 \left(\frac{\partial^2 T_1}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_1}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_1}{\partial z^2} \right), \quad 0 < r \leq r_1, \quad 0 < z < L; \quad (4)$$

$$\frac{\partial T_2}{\partial \tau} = a_2 \left(\frac{\partial^2 T_2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_2}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_2}{\partial z^2} \right), \quad r_1 < r \leq r_2, \quad 0 < z < L; \quad (5)$$

$$\frac{\partial T_3}{\partial \tau} = a_3 \left(\frac{\partial^2 T_3}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_3}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_3}{\partial z^2} \right), \quad r_2 < r \leq r_3 = r_{\text{скв}}, \quad 0 < z < L. \quad (6)$$

Определим граничные условия (ГУ): условие адиабатичности на оси первого тела при $r = 0$ задает левое граничное условие (условие симметрии температурного поля относительно оси цилиндра) [6]

$$\left. \left(\frac{\partial T_1}{\partial r} \right) \right|_{r=0} = 0. \quad (7)$$

На границе областей I — II и II — III — ГУ IV рода [6, 7]:

$$\lambda_1 \left. \left(\frac{\partial T_1}{\partial r} \right) \right|_{r=r_1} = \lambda_2 \left. \left(\frac{\partial T_2}{\partial r} \right) \right|_{r=r_1}, \quad (T_1)_{r=r_1} = (T_2)_{r=r_1} \quad (8)$$

$$\lambda_2 \left. \left(\frac{\partial T_2}{\partial r} \right) \right|_{r=r_2} = \lambda_3 \left. \left(\frac{\partial T_3}{\partial r} \right) \right|_{r=r_2}, \quad (T_2)_{r=r_2} = (T_3)_{r=r_2}; \quad (9)$$

а на границе III — IV (ГУ I рода), без учета теплового влияния на окружающие скважину горные породы предыдущих технологических операций

$$(T_3(z))_{r=r_3} = T_{cmam}(z), \quad (10)$$

где $T_{cmam}(z)$ — температура горных пород, окружающих скважину, при $\tau > 0$. Для замкнутости ГУ по верхней и нижней границе тел I, II, III положим также

$$\begin{cases} T_1(0 < r \leq r_1, z = 0) \\ T_2(r_1 < r \leq r_2, z = 0) \\ T_3(r_2 < r \leq r_3, z = 0) \end{cases} = T_{epad}(0), \quad (11)$$

$$\begin{cases} T_1(0 < r \leq r_1, z = L) \\ T_2(r_1 < r \leq r_2, z = L) \\ T_3(r_2 < r \leq r_3, z = L) \end{cases} = T_{epad}(L), \quad (12)$$

где $T_{epad}(0)$ и $T_{epad}(L)$ — температуры горных пород на соответствующих глубинах.

Зададим начальные условия (НУ). Для этого определим температуру промывочной жидкости при $\tau = 0$ в области I ($T_{bh_y}(z)$) и в области III ($T_{bh_e}(z)$) как известные температуры предыдущего данному технологического процесса

$$T_1(z) = T_{bh_y}(z), \quad T_3(z) = T_{bh_e}(z), \quad (13)$$

а температуры на стенках БК и внутри — через соответствующие коэффициенты теплоотдачи (α_1, α_3) и температуры ПЖ [4, 8]

$$T_2(r, z) = f(T_1(z), T_3(z), \alpha_1, \alpha_3). \quad (14)$$

Решение задачи ищем приближенным численным методом. Для этого проведем аппроксимацию уравнений теплопроводности (4)–(6) по неявной шеститочечной симметричной разностной схеме для двух переменных [6]

$$\frac{T_{Xij}^{k+} - T_{Xij}^k}{\Delta \tau} = a_X \left(\begin{array}{l} \frac{T_{Xi+j}^{k+} - 2T_{Xij}^{k+} + T_{Xi-j}^{k+}}{h_{Xr}^2} + \\ + \frac{1}{r_{Xi}} \frac{T_{Xi+j}^{k+} - T_{Xi-j}^{k+}}{2h_{Xr}} + \\ + \frac{T_{Xij+}^{k+} - 2T_{Xij}^{k+} + T_{Xij-}^{k+}}{h_z^2} \end{array} \right) + O(\Delta \tau, h^2), \quad (15)$$

где i, j — индексы узлов сетки по координатам r, z соответственно, k — временной слой (для краткости записи встречающиеся индексы в выражениях, содержащие «+» или «-», означают «+1», «-1» соответственно); индекс X — это «1», «2», либо «3»: уравнения теплопроводности соответствующих областей; $O(\Delta\tau, h^2)$ — порядок погрешности, получаемой после отбрасывания остаточных членов разложения в ряд Тейлора [6], которой в дальнейшем пренебрегаем; $h_{Xr} = \frac{R_X}{N_X}$ — шаг дискретизации по оси r ; $h_z = \frac{L}{M}$ — шаг сетки по оси z ;

$\Delta\tau$ — шаг дискретизации по времени. Также необходимо провести аппроксимацию граничных условий. Схема левого ГУ (7) показана на рисунке 2.

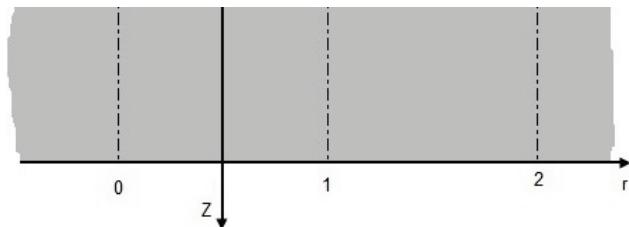


Рис. 2. Фрагмент сеточной области при задании граничных условий на оси симметрии температурного поля, являющегося центром тела

$$\frac{T_1 - T_0}{h_{1r}} = 0, \text{ откуда } T_0 = T_1. \quad (16)$$

Схема для ГУ между областями I — II и II — III (8) представлена на рисунке 3.

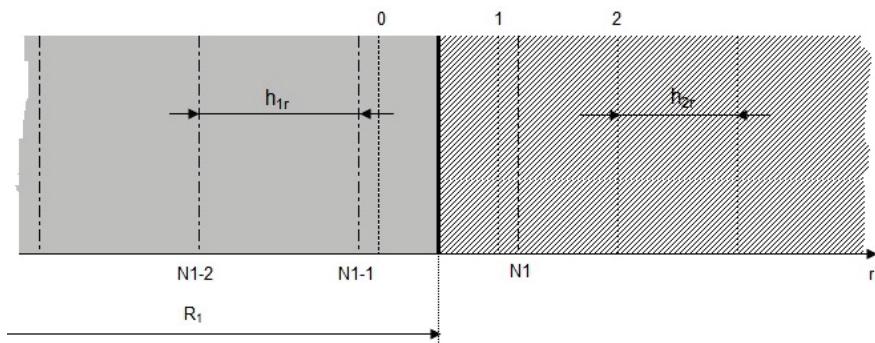


Рис. 3. Фрагмент сеточной области на границе областей при задании граничных условий IV рода

$$\begin{cases} \lambda_1 \frac{T_1 - T_{N1-1}}{h_{1r}} = \lambda_2 \frac{T_2 - T_0}{h_{2r}}, \\ \frac{T_1 + T_{N1-1}}{2} = \frac{T_2 + T_0}{2} \end{cases}, \quad (17)$$

откуда

$$T_{N1} = \frac{(1 - S_{12})}{(1 + S_{12})} T_1_{N1-1} + \frac{2S_{12}}{(1 + S_{12})} T_2_0, \quad (18)$$

$$T_2 = \frac{(1-S_{12})}{(1+S_{12})} T_1 + \frac{2}{(1+S_{12})} T_{N1-1}, \quad (19)$$

где $S_{12} = \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \frac{h_{1r}}{h_{2r}}$. Вывод для ГУ (9) аналогичен (18), (19) с учетом собственных индексов.

Решение уравнения (15) удобно искать методом расщепления по пространственным координатам (локально-одномерная схема) [6, 7, 9, 10], суть которого заключается в следующем: на каждом временном слое поочередно решаются уравнения теплопроводности, записанные раздельно для каждой пространственной координаты. В нашем случае уравнение (15) распадается на два:

$$\frac{T_{Xij}^{k+1/2} - T_{Xij}^k}{0,5\Delta\tau} = a \left(\frac{T_{Xi+j}^{k+1/2} - 2T_{Xij}^{k+1/2} + T_{Xi-j}^{k+1/2}}{h_{Xr}^2} + \frac{1}{r_i} \frac{T_{Xi+j}^{k+1/2} - T_{Xi-j}^{k+1/2}}{2h_{Xr}} \right), \quad (20)$$

$$\frac{T_{Xij}^{k+} - T_{Xij}^{k+1/2}}{0,5\Delta\tau} = a \left(\frac{T_{Xij+}^{k+} - 2T_{Xij}^{k+} + T_{Xij-}^{k+}}{h_z^2} \right). \quad (21)$$

Приведение (20) и (21) к каноническому виду системы линейных уравнений с трехдиагональной матрицей совместно с ГУ и НУ позволяет решать систему уравнений (4)–(14) методом прогонки [7, 10, 11].

На рисунке 4 представлена зависимость температурной стабилизации заданного участка ствола скважины от времени.

Расчеты производились программно для заданных величин: $r_1 = 0,0545\text{м}$ — внутренний радиус БК;

$r_2 = 0,0635\text{м}$ — наружный радиус БК; $r_3 = 0,148\text{м}$ — радиус скважины; $L = 500\text{м}$ — длина вертикального участка скважи-

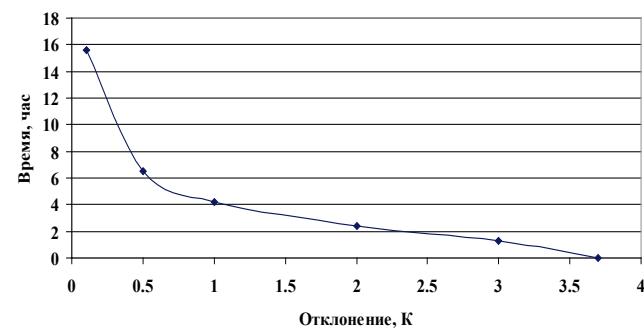


Рис. 4. Зависимость температурной стабилизации ствола скважины от времени

$\lambda_1 = \lambda_3 = 0,659 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$ — теплопроводность ПЖ; $c_{p1} = c_{p3} = 4100 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$ — теплоемкость; $\rho_1 = \rho_3 = 1100 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ — плотность [12],

$\eta = 0,019 \text{Па} \cdot \text{с}$ — динамическая вязкость промывочной жидкости, $\varrho_{ex} = 0,035 \frac{\text{м}^3}{\text{с}}$ — расход ПЖ предшествующий текущей технологической операции; $\lambda_2 = 47,65 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$ — теплопроводность;

$c_{p2} = 469 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$ — теплоемкость, $\rho_2 = 7850 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ — плотность БК [13]; $\Delta\tau = 10\text{с}$ — временной шаг расчета; $\varepsilon \leq 5\%$ — максимально допустимое отклонение температур по заданному участку ствола скважины.

Таким образом, на основании результатов расчетов можно сделать следующие выводы:

- время температурной стабилизации для выбранного участка начинается с ~10 ч, что по технологическим процессам соотносится со временем спускодельных операций;
- наступление стабилизации по времени позволяет оправданно переопределять значения ранее вычисленных температурных полей скважины для исключения накопления в них ошибок из-за погрешности вычислений;
- время технологических процессов, определяемых как наращивание обычно меньше десятков минут, поэтому передачей тепла теплопроводностью при таких операциях возможно в расчетах пренебрегать;
- полученная модель передачи тепла теплопроводностью позволяет вычислять изменение температурных полей в скважине во времени, что позволяет последовательно определить НУ и ГУ для следующих технологических процессов.

Библиографический список

1. Лукьянов Э. Е. Исследование скважин в процессе бурения. – М.: Недра, 1979. – 248 с.
2. Лукьянов Э. Е., Стрельченко В. В. Геолого-технологические исследования в процессе бурения. – М.: Нефть и газ, 1997. – 688 с.
3. Пасконов В. М., Полежаев В. И., Чудов Л. А. Численное моделирование процессов тепло- и массообмена. – М.: Наука, 1984. – 288 с.
4. Михеев М. А., Михеева И. М. Основы теплопередачи. – М.: Энергия, 1977. – 344 с.
5. Самарский А. А., Вабишевич П. Н. Вычислительная теплопередача. – М.: Издатель УРСС, 2003. – 784 с.
6. Моделирование тепловыделяющих систем: учеб. пособие / Р. А. Дорохов [и др.]. – Томск: Изд-во НТЛ, 2000. – 234 с.
7. Кузнецов Г. В., Шеремет М. А. Разностные методы решения задач теплопроводности: учеб. пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – 172 с.
8. Дульнев Г. Н., Тихонов С. В. Основы теории тепломассообмена. – СПб.: СПбГУИТМО, 2010. – 93 с.
9. Дульнев Г. Н., Парфенов В. Г., Сигалов А. В. Применение ЭВМ для решения задач теплообмена. – М.: Высшая школа, 1990. – 207 с.
10. Самарский А. А. Теория разностных схем. – М.: Наука, 1989. – 616 с.
11. Волков Е. А. Численные методы. – М.: Наука, 1987. – 248 с.
12. Чиркин В. С. Теплофизические свойства материалов (справочное руководство). – М.: Гос. изд-во физико-математической лит-ры, 1959. – 356 с.
13. Седов В. Т. Теплообмен при бурении мерзлых пород. – Л.: Недра, 1990. – 127 с.

Сведения об авторах

Логинов Владимир Степанович, д. ф.-м. н., профессор кафедры теоретической и промышленной теплофизики Энергетического института, Томский политехнический университет, г. Томск, e-mail: LoginovVS@tpu.ru

Милютин Виктор Геннадьевич, аспирант кафедры теоретической и промышленной теплофизики Энергетического института, Томский политехнический университет, г. Томск, e-mail: milyutinvg@mail.ru

Information about the authors

Loginov V. S., Doctor of Physics and Mathematics, Professor at the Department of Theoretical and Industrial Thermophysics of Power Engineering Institute, Tomsk Polytechnic University, e-mail: LoginovVS@tpu.ru

Milyutin V. G., Postgraduate at the Department of Theoretical and Industrial Thermophysics of Power Engineering Institute, Tomsk Polytechnic University, e-mail: milyutinvg@mail.ru

УДК 553.98;536.2

ОТБОР ГАЗА ИЗ ГИДРАТОСОДЕРЖАЩЕЙ ЗАЛЕЖИ ПРИ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ GAS PRODUCTION FROM THE HYDRATE RESERVOIR AT NEGATIVE TEMPERATURES

Н. Г. Мусакаев, С. Л. Бородин
N. G. Musakaev, S. L. Borodin

Тюменский филиал Института теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН, г. Тюмень
Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень

Ключевые слова: газовый гидрат; фазовый переход; вычислительный эксперимент
Key words: gas hydrate; phase transition; numerical experiment